

스핀 코팅 공정에 따른 액정디스플레이용 폴리이미드 배향막 특성 분석

김진아¹, 최세훈¹, 박흥규^{1,2} 

¹ 창원대학교 스마트제조융합협동과정

² 창원대학교 전기전자제어공학부

Effect of Spin Coating Speed on Characteristics of Polyimide Alignment Layer for Liquid Crystal Display

Jin-Ah Kim¹, Se-Hoon Choi¹, and Hong-Gyu Park^{1,2}

¹ Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

² Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

(Received September 10, 2021; Revised October 5, 2021; Accepted October 11, 2021)

Abstract: The field of liquid crystal display (LCD) is constantly in the spotlight and the process of depositing an alignment layer in the LCD manufacturing process is very important to obtain excellent performance such as low-power driving and high-speed response to improve LCD performance. Therefore, research on liquid crystal (LC) alignment is being actively conducted. When manufacturing LCD, it is necessary to consider the effect of the alignment layer thickness as one of the factors affecting various LCD performances. In addition, previous studies confirmed the LC alignment characteristics correlate with the rotation speed in the spin coating process. Therefore, the electro-optical properties of the LCD were investigated by manufacturing a polyimide alignment layer by varying the rotation speed in the spin coating process in this study. It was confirmed that the thickness of the polyimide alignment layer was controlled according to the spin coating conditions. The average transmittances of anti-parallel LC cells at the spin coating speed of 2,500 rpm and 3,000 rpm are about 60%, which indicates that the LC cell has relatively higher performance. At the spin coating speed of 3,000 rpm, the voltage-transmittance curve of twisted nematic (TN) LC cell was below 1.5 V, which means that the TN LC cell operated at a low power. In addition, high-speed operating characteristics were confirmed with a response time of less than 30 ms. From these derived data, we confirmed that the ideal spin coating speed is 3,000 rpm. And these results provide an optimized polyimide alignment layer process when considering enhanced future LCD manufacturing.

Keywords: Liquid crystal alignment, Polyimide, Spin coating process, Electro-optical properties

1. 서론

현재 디스플레이 시장은 LCD (liquid crystal display) 와 OLED (organic light emitting diode)로 양분화되어 있다. OLED는 스마트폰 및 각종 IT 기기에 사용되고 있으며 수요의 확대로 관련 기술 및 시장이 크게 활성화되고 있지만, 그럼에도 세계 디스플레이 시장 점유율은 LCD가 우

✉ Hong-Gyu Park; hgpark@changwon.ac.kr

Copyright ©2022 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

세를 띠고 있다. LCD가 가진 긴 수명과 높은 신뢰성이라는 장점에 가격 경쟁력이 더해져 꾸준한 상승세를 이어가고 있다. 또한, 차세대 디스플레이로 불리는 mini LED, QLED 등을 적용한 새로운 디스플레이 시장에 등장하여 LCD가 다시금 주목을 받고 있다 [1,2].

이를 제작하는 공정 중 하나인 액정 배향 공정은 전기광학특성을 우수하게 만드는 중요한 공정 중 하나이다 [3,4]. 액정 배향 공정을 진행하기 위해 ITO (indium-tin-oxide)가 코팅된 유리 기판 위에 액정 배향막을 제작해 주어야 하며, 그 위에 액정을 균일하게 배향하기 위해서 다양한 배향법이 사용되고 있다. 액정 배향법은 크게 접촉식(contact) 배향법과 비접촉식(non-contact) 배향법으로 나뉘며, 접촉식 배향법으로는 러빙법(rubbing method)이 있으며, 비접촉식 배향법으로는 이온빔(ion beam) 조사법, UV 조사법, 경사증착법 등이 대표적으로 사용된다. 이 중 접촉식 배향법인 러빙법은 비용이 경제적이며 공정이 단순하므로 연구, 산업적 측면에서 광범위하게 사용되고 있다 [5,6]. 대표적인 액정 배향막 재료로 폴리이미드(polyimide)가 사용되고 있으며 우수한 내화특성과 기계적 특성으로 인해 연관이 되는 연구도 지속적으로 진행 중이다 [7,8]. 박막을 증착하는 공정으로는 물리적 증착법(physical vapor deposition, PVD), 화학 기상 증착법(chemical vapor deposition, CVD), 스핀 코팅(spin coating) 등 여러 방법이 존재한다. 이 중 스핀 코팅 공정은 폴리이미드 용액을 고속으로 회전시키며 액체의 구심력과 표면 장력을 통해 균일한 표면을 형성시킬 수 있도록 하는 공정으로, 빠르고 단순한 공정과 저렴한 비용이라는 이점으로 손쉽게 사용되고 있다 [9-12]. 또한, 스핀 코팅 공정은 코팅 시간과 회전 속도에 따라 박막 두께를 쉽게 조절할 수 있어 공정 시 변수 제어에도 용이하다 [13,14].

본 연구에서는 폴리이미드 배향막 증착을 위해 ITO 유리 기판 위에 스핀 코팅 공정 시 회전 속도를 달리하였을 때 만들어지는 박막의 두께에 대해 나타나는 표면 특성, 액정 배향 특성, 전기광학특성을 두루 살펴보았다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 액정 배향막으로, 수평 폴리이미드(SE-7492, Nissan Chemical Engineering Co.)를 사용하였다. 폴리이미드는 $32 \times 22 \times 1.1 \text{ mm}^3$ 의 약 $10 \Omega/\square$ 의 면저항을 갖는 ITO 전극이 형성된 유리 기판(1737 glass, Corning Inc.) 위에 스핀 코팅 방법을 이용하여 균일하게 코팅하였다. 폴리이미드 배향막을 형성하기 전 ITO가 코팅된 유리 기판을 아세톤(acetone), 이소프로필알코올

(isopropyl alcohol) 그리고 DI (deionized) water에서 초음파 세척을 이용하여 각각 10분간 세척을 진행한 후 건조보관함에서 3시간 동안 건조하였다. ITO가 코팅된 유리 기판 위에 폴리이미드 용액을 스핀 코팅하였으며, 1차로 700 rpm에서 5초 동안 코팅 후 2차로 1,500 rpm, 2,000 rpm, 2,500 rpm, 3,000 rpm, 그리고 3,500 rpm에서 30초간 스핀 코팅을 진행하였다. 코팅 직후 핫플레이트에서 80°C 의 온도로 10분간 소프트 베이킹(soft baking) 과정과 진공 오븐에서 230°C 의 1시간 동안 하드 베이킹(hard baking)의 소성과정을 통해 폴리이미드 배향막을 제작하였다. 이후 나일론 천이 감긴 러빙기(SRMS-50-M, ScienceTown)를 사용하여 폴리이미드 배향막을 동일한 러빙 강도로 러빙 처리하였다.

스핀 코팅 회전 속도에 따른 폴리이미드 배향막의 두께를 평가하기 위해 surface profiler (Dektak X Stylus Profiler, Bruker)를 측정하였고, 원자힘현미경(atomic force microscopy, AFM, XE-100, Park systems)을 통해 폴리이미드 배향막의 표면 거칠기를 확인하였다. 그리고 폴리이미드 배향막 두께에 따른 표면 특성과 광학 특성을 관찰하기 위해 폴리이미드의 표면 접촉각(UNI-CAM/A, GITSoftTech)을 측정하였고, 배향막과 그것을 이용한 액정셀의 UV-Vis transmittance (V-650, JASCO Corporation)를 측정하였다. 액정셀은 폴리이미드 배향막의 광학적 특성을 평가하기 위한 AP (anti-parallel) 액정셀과 전기광학특성을 평가하기 위한 TN (twisted nematic) LC셀을 샌드위치형으로 제작하였으며 두께는 각각 $60 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$ 로 조절하였다. 액정셀을 제작하기 위해 액정은 수평 타입의 ZSM-50087XX (JNC, $\Delta\epsilon = 4.1$, $\Delta n = 0.110$)를 사용하였다. 다양한 두께의 폴리이미드 배향막 위에서 액정 배향능력을 평가하기 위해 편광현미경(BX53M, Olympus)으로 액정셀을 관찰하였고 결정회전법을 이용해 액정셀의 선경사각 (TBA 107 evaluation device, Autronic)을 측정하였다. 마지막으로 TN 셀의 전기광학특성을 평가하기 위해 전기광학특성평가장치(LCMS-200, Sesim Photonics Technology Co.)를 이용하여 전압-투과율(voltage-transmittance) 측정 및 응답속도(response time) 측정 그리고 잔류 DC 전압(residual DC)을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 스핀 코팅 회전 속도에 따른 폴리이미드 배향막의 두께 측정값을 나타냈다. 1,500 rpm, 2,000 rpm, 2,500 rpm, 3,000 rpm, 3,500 rpm으로 스핀 코팅 회전

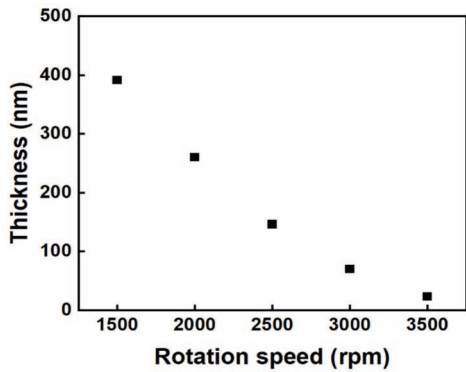


Fig. 1. Thickness of polyimide alignment layers as a function of spin coating rotation speed.

속도가 증가하는 것과 달리 배향막의 두께는 400 nm, 270 nm, 145 nm, 70 nm, 33 nm로 점차 얇아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 회전수가 늘어날수록 원심력에 따라 폴리이미드 용액이 회전 반경 방향으로 흘러 나가는 양이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

그림 2는 스핀 코팅 회전 속도에 따른 폴리이미드 배향막의 표면 거칠기를 측정된 AFM 이미지로 나타낸 것이며 표 1은 측정된 거칠기 값을 나타낸 것이다. 그림 2와 표 1에서 확인된 표면 거칠기는 전체적으로 균일함을 확인할 수 있다. 특히 계산된 R_a 의 값을 살펴보면 1,500 rpm, 2,000 rpm, 2,500 rpm, 3,000 rpm, 3,500 rpm의 스핀 코팅 회전 속도를 갖는 폴리이미드 배향막 표면 거칠기는 각각 0.80 nm, 0.56 nm, 0.72 nm, 0.55 nm, 0.55 nm로 비교적 균일한 값을 가지는 것을 확인할 수 있고, 스핀 코팅 회전 속도가 증가할수록 표면 거칠기가 개선되는 경향을 알 수 있었다.

그림 3에서는 스핀 코팅 공정을 통해 제작된 폴리이미드 배향막에서의 가시광선 영역대의 투과도를 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 ITO 유리 기판 위 폴리이미드 배향막이 형성된 단일 기판에 대해 측정된 그래프이고, 그림 3(b)는 두 장의 폴리이미드 기판을 합쳐 60 μm 셀갭을 갖는 AP 액정

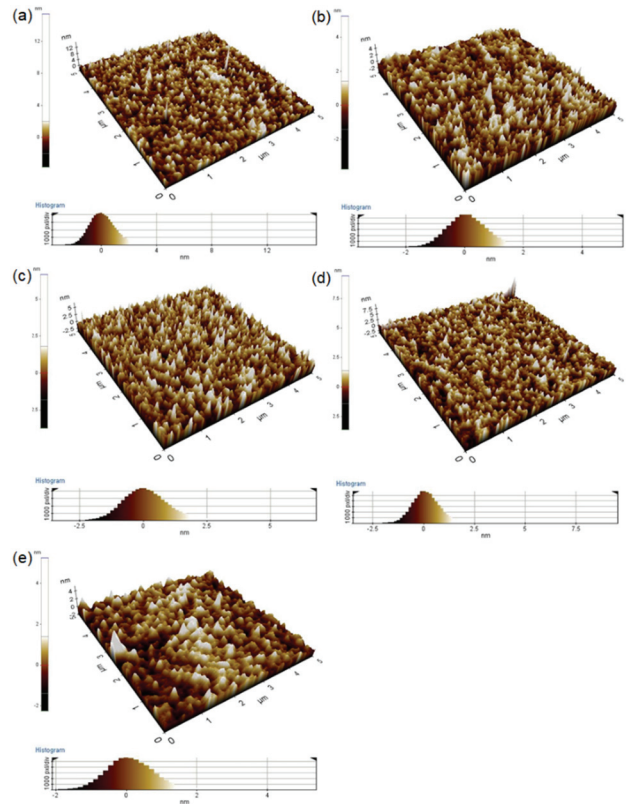


Fig. 2. AFM images of polyimide alignment layers according to spin coating rotation speed: (a) 1,500 rpm, (b) 2,000 rpm, (c) 2,500 rpm, (d) 3,000 rpm, and (e) 3,500 rpm.

셀을 제작하여 측정된 그래프이다. 그림 3(a)의 그래프에서는 가시광선 영역 대의 평균 투과율의 차이가 크지 않았으나, 그림 3(b)에서는 스핀 코팅 회전수가 높아짐에 따라 폴리이미드 배향막의 두께가 얇아져, AP 액정셀의 가시광선 영역대의 평균 투과율이 증가하는 모습을 보여 주었다. 표 2는 스핀 코팅 회전수에 따른 폴리이미드 단일 기판과 AP 액정셀의 가시광선 영역대의 평균 투과율을 보여준다.

Table 1. AFM surface roughness analysis of polyimide alignment layers according to spin coating rotation speed.

Spin coating rotation speed (rpm)	Maximum height (R_{max}) (nm)	RMS roughness (R_q) (nm)	Average roughness (R_a) (nm)
1,500	15.41	1.03	0.80
2,000	5.25	0.72	0.56
2,500	6.67	0.92	0.72
3,000	9.43	0.72	0.55
3,500	5.24	0.71	0.55

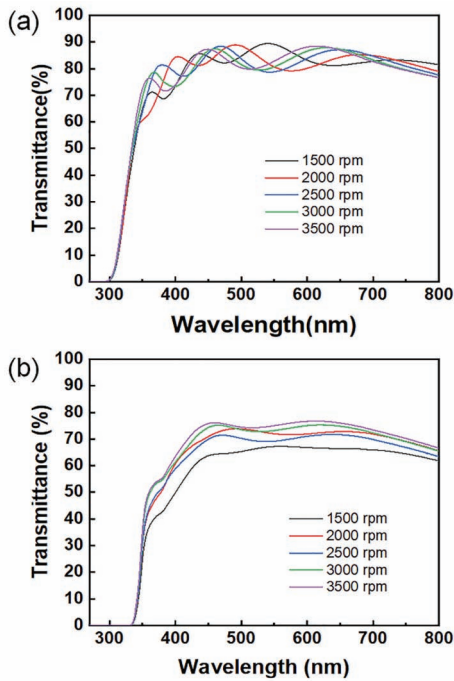


Fig. 3. UV-visible transmittance spectra of polyimide alignment layers at different spin coating rotation speed: (a) single polyimide alignment layer substrate on ITO glass substrate and (b) AP LC cells with polyimide alignment layers.

그림 4에서는 ITO 유리 기판 위 폴리이미드 배향막이 형성된 단일 기판에서의 표면 접촉각과 표면에너지를 측정 한 결과를 보여준다. 표면 접촉각은 액체가 기판의 표면과 접할 때 형성되는 경계면의 각을 측정하는 것으로, 일반적으로 표면 접촉각이 90°보다 작으면 고체 표면은 친수성으로 간주되며 접촉각이 90°보다 크면 고체 표면은 소수성으로 간주된다. 표면 에너지는 Van Oss 산-염기 이론에 기반한 극성 표면에 대한 Young의 방정식에 따라 계산되었다 [15,16]. 그림 4(a)를 통해 1,500 rpm에서 3,000 rpm으로 스핀 코팅 회전 속도가 증가할수록 표면 접촉각과 표면 에너지가 줄었음을 확인했다. 이는 배향막이 균일하게 형성되었으며 접촉각이 감소함에 따라 친수성 특성이 증가했음을 의미한다. 또한, 이러한 친수성 특성은 수평 폴리이미드의 배향에 영향을 끼치는 것으로 알려졌다 [17]. 스핀 코팅 회전 속도가 3,500 rpm에서는 접촉각이 크게 증가하는 모습을 보여주었는데, 스핀 코팅 회전 속도가 증가함에 따라 폴리이미드 배향막이 매우 얇게 형성되어 ITO 코팅된 유리 기판과의 접촉각과 유사한 값을 나타내는 것으로 보인다. 그림 4(b)에서 표면 접촉각에 의해 계산된 표면 에너지를 나타낸다. 표면 접촉각이 감소함에 따라 이에 표면 에너지는 증가함을 확인했으며 이러한 친수성 특성의 증가는 폴리이미드 배향막 위에서 액정 분자가 정렬될

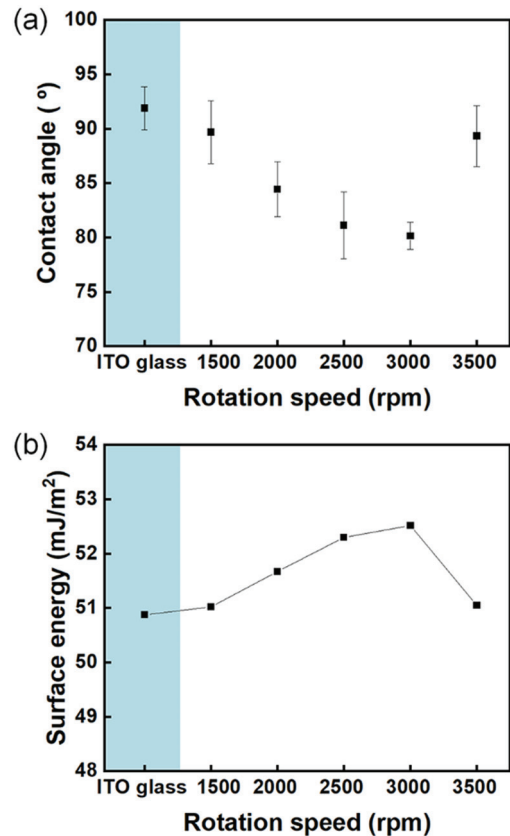


Fig. 4. (a) Contact angles and (b) surface energies of polyimide alignment layers according to spin coating rotation speed.

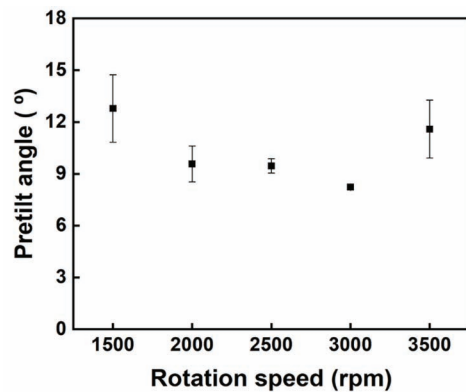


Fig. 5. Pretilt angles of LC molecules on polyimide alignment layers according to spin coating rotation speed.

때 균일한 수평 액정 배향이 가능함을 의미한다.

그림 5는 AP 액정셀로 제작했을 때 폴리이미드 배향막 위에서의 액정 배향 능력을 평가하기 위해 결정회전법을 이용해 액정셀의 선경사각을 측정한 것이다. 선경사각은

각 스핀 코팅 회전 속도별로 제작된 AP 액정셀에서 다른 위치에서 4회씩 측정되었다. 측정된 값들의 평균값 및 표준편차 값을 아래 그래프에 나타내었다. 2,500 rpm, 3,000 rpm의 스핀 코팅 회전 속도를 갖는 AP 액정셀에서는 각 측정 위치에서 편차가 거의 없는 균일한 값을 보여주어 액정 배향 능력이 상대적으로 뛰어남을 확인할 수 있었다. 반면 1,500 rpm, 2,000 rpm과 3,500 rpm의 AP 액정셀에서는 측정 위치에 따라 큰 표준편차가 존재하여 배향이 고르지 못함을 확인할 수 있었다.

각 스핀 코팅 회전 속도에 따라 형성된 폴리이미드 배향막의 두께별 액정디스플레이 적용 효과를 관찰하기 위해 TN 액정셀을 제작하였다. 그림 6은 스핀 코팅 회전 속도에 따른 TN 액정셀의 전기광학특성을 평가하기 위해 전압-

투과율 특성과 응답속도를 측정한 결과이다. 그림 6(a)는 0 V부터 7 V까지 전압을 0.2 V씩 증가시키면서 TN 액정셀에서의 투과율 변화를 측정한 그래프이다. 액정셀 양쪽에 편광판을 교차 방식으로 부착하여 NW (normally white) 상태로 만든 후 전기광학 특성을 측정하였다. 표 2에는 투과율이 90%가 되는 지점인 문턱 전압(V_{th} , threshold voltage)의 측정값과, 투과율이 10%가 되는 지점인 포화 전압(V_{sat} , saturation voltage) 사이의 유효 스위칭 전압(effective switching amplitude)을 나타냈다. 스핀 코팅 회전 속도가 1,500 rpm인 TN 액정셀의 경우, 3.5 V 이상의 전압에서 어렵게 표현되지 않고 비정상적인 밝기가 나타났다. 반면, 2,000 rpm 이상의 스핀 코팅 회전 속도를 갖는 TN 액정셀에서는 정상적인 동작을 나타냈다. 2,000 rpm, 2,500 rpm, 3,000 rpm의 TN 액정셀은 문턱 전압이 1.5 V 내로 저전압 구동을 하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, TN 액정셀의 동작을 평가하기 위한 유효 스위칭 전압을 살펴보면, 스핀 코팅 회전 속도가 3,000 rpm에서 0.83 V로 가장 우수한 전압-투과율 특성을 나타냈다. 그림 6(b)는 전압을 0 V에서 7 V로, 7 V에서 0 V로 순차적으로 변화시켰을 때 액정셀의 응답속도를 나타낸 그래프이다. 0 V에서 7 V로 전압을 증가시켰을 때 V_{th} 에서 V_{sat} 로 변화하는 시간을 R.T. (rising time)라 정의하며, NW의 액정셀에서 액정이 동작하고 빛이 편광판을 투과하지 못하는 상태가 되어 투과율이 감소하게 된다. 반대로 전압이 7 V에서 0 V로 감소할 때 V_{sat} 에서 V_{th} 로 변화하는 시간을 F.T. (falling time)라 정의하며, 액정셀 내에서 동작하던 액정이 제자리로 서서히 돌아오며 원래의 NW 상태로 돌아오게 된다. 표 2에서 액정셀별 R.T.와 F.T.를 확인할 수 있고 두 시간을 합산하여 도출된 시간을 총 응답시간(total response time)으로 나타냈으며, 모든 액정셀이 인간이 감지할 수 있는 가장 짧은 시간인 30 ms 이내의 값을 보여주어 평균 응답시간이 우수함을 확인할 수 있었다 [18].

마지막으로, 그림 7은 스핀 코팅 회전 속도에 따라 형성된 폴리이미드 배향막이 적용된 TN 액정셀의 잔류 DC 전압을 측정한 그래프이다. 잔류 DC 전압은 DC sweep에 의한 TN 액정셀의 투과율을 측정한 것이다. TN 액정셀에서 액정층에 존재하던 불순 이온들이 외부 전압이 인가된 후

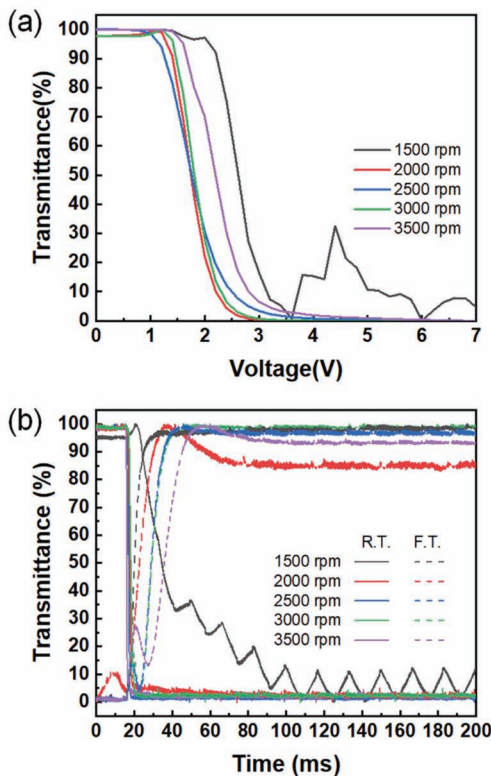


Fig. 6. Electro-optical properties of TN LC cells with polyimide alignment layers: (a) voltage-transmittance and (b) response time.

Table 2. Average transmittance of visible light region of polyimide alignment layers as a function of spin coating rotation speed.

Spin coating rotation speed (rpm)		1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
Average transmittance (%)	Single polyimide alignment layer	76.63	76.64	77.04	76.91	77.23
	AP LC cells	55.85	61.76	60.26	63.27	64.53

폴리이미드 배향막 유전체층에 흡착 및 분극 되어 DC offset 전압을 발생시키고, 이후 외부 전압을 제거하여도 턴오프 상태로 돌아감에 있어 지연이 발생시키게 되는 원인이 되어 잔상현상을 야기한다 [19]. (+) 인가 전압과 (-) 인가 전압에서의 50% 투과율 지점 전압 차를 각각 (+) RDC, (-) RDC라 정의하였다. 잔류 DC 전압을 측정하기 위해 인가된 DC 전압은 0 V에서 +5 V 증가된 다음, 다시 +5 V에서 -5 V, 마지막으로 -5 V에서 0 V로 변화하는 주기로 2회 측정되었다. 표 3에서 보이듯이, 스핀 코팅 회전 속도가 1,500 rpm, 2,000 rpm, 2,500 rpm, 3,000rpm, 3,500 rpm인 TN 액정셀의 (+) RDC는 1.25 V, 1.28 V, 0.36 V, 0.02 V, 1.47 V로 각각 측정되었고 (-) RDC는 1.31 V, 1.29 V, 0.40 V, 0.02 V, 1.51 V로

측정되었다. 3,500 rpm의 TN 액정셀에서는 큰 잔류 DC 전압을 나타내었는데, 이는 폴리이미드 배향막이 매우 얇게 증착되어 배향막의 영향보다 ITO 전극의 영향이 크게 미쳐 TN 액정셀이 제대로 된 동작을 하지 못해 큰 잔류 DC 전압 값을 가지게 된 것으로 보인다. 반면, 3,000 rpm의 스핀 코팅 회전 속도를 갖는 TN 액정셀에서 잔류 DC 전압의 차이는 매우 작았으며 (+) RDC, (-) RDC의 값에도 차이가 없어 안정적으로 동작함을 확인했으며 잔상현상이 발생하지 않을 것으로 예상된다. 폴리이미드 배향막의 두께가 감소함에 따라 폴리이미드 배향막에 흡착된 불순 이온에 의한 전기이중층이 감소하고, 이에 따라 잔류 DC 전압이 감소하게 된다 [19-21].

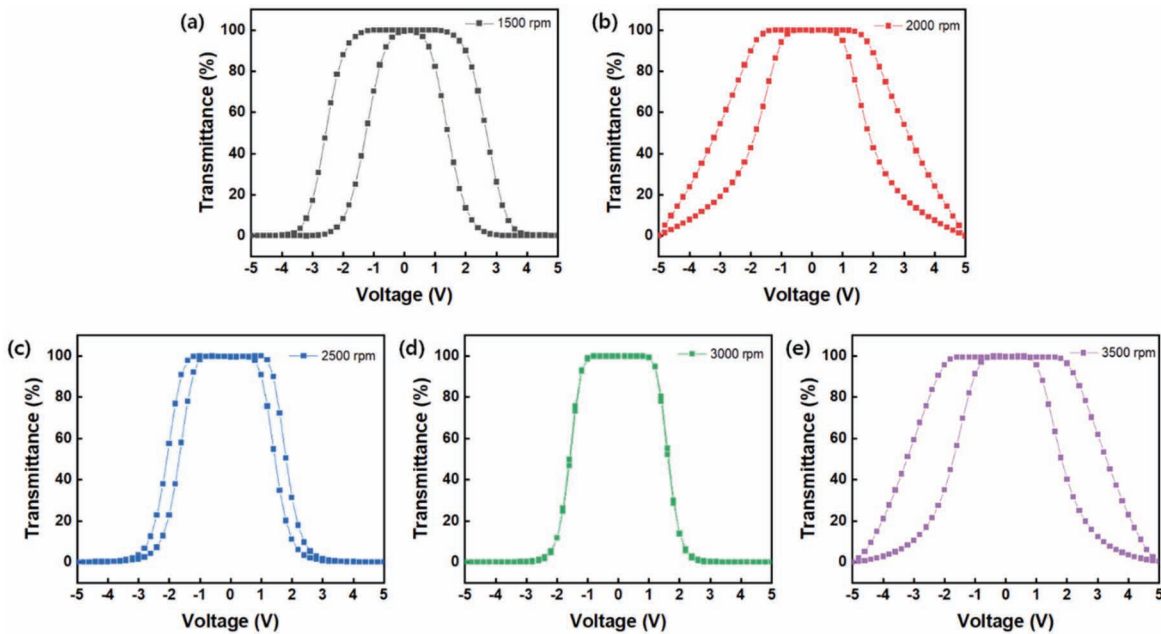


Fig. 7. Residual DC characteristic of TN LC cells as a function of spin coating rotation speed: (a) 1,500 rpm, (b) 2,000 rpm, (c) 2,500 rpm, (d) 3,000 rpm, and (e) 3,500 rpm.

Table 3. Electro-optical properties of TN LC cells with polyimide alignment layers using various spin coating rotation speed.

Spin coating rotation speed (rpm)	Threshold voltage (V)	Switching amplitude (V)	Response time (ms)		
			Rising time	Falling time	Total
1,500	2.23	0.92	2.18	22.71	24.89
2,000	1.33	0.85	0.99	19.24	20.23
2,500	1.27	1.23	0.59	7.17	7.76
3,000	1.47	0.83	1.47	17.52	18.99
3,500	1.64	0.89	2.12	27.88	30.00

Table 4. Residual DC voltage characteristics of TN LC cells as a function of a spin coating rotation speed.

Spin coating rotation speed (rpm)	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
(+) RDC (V)	1.26	1.28	0.36	0.02	1.47
(-) RDC (V)	1.31	1.29	0.40	0.02	1.51

4. 결론

본 연구에서는 스핀 코팅 공정에서의 회전 속도 변화에 따른 폴리이미드 배향막의 표면 특성, 액정 배향 능력 및 전기광학특성에 대하여 검토하였다. 회전 속도가 증가할수록 표면에 코팅되는 폴리이미드 배향막은 얇아졌으며, 폴리이미드 배향막의 표면 거칠기 또한 균일해지는 경향을 확인했다. AP 액정셀의 가시광선 영역대에서의 투과율은 스핀 코팅 회전 속도가 증가함에 따라 점차 증가하는 모습을 보였다. 액정 배향 특성을 확인하기 위해 선경사각을 측정할 경우에는 2,500 rpm, 3,000 rpm에서 각 포인트당 측정된 값이 오차 없이 균일한 모습을 보여주었고, 이는 액정 배향 능력이 타 회전 속도에 비해 상대적으로 뛰어나다는 것을 확인했다. 그리고 스핀 코팅 회전 속도에 따라 형성된 폴리이미드 배향막의 액정디스플레이 적용 효과를 관찰하기 위해, TN 액정셀을 제작하여 전기광학특성을 확인해 보았다. 그 결과 전압-투과율 특성에서 2,000 rpm 이상의 스핀 코팅 회전 속도를 갖는 TN 액정셀에서 정상적인 동작을 확인하였고, 3,500 rpm을 제외한 모든 조건에서 1.5 V 이하의 저전압 구동이 가능함을 확인하였다. 또한 응답속도 특성에서 모든 액정셀이 30 ms 이내의 값으로 평균 응답시간이 우수함을 확인하였다. 마지막으로 TN 액정셀의 잔류 DC 전압을 측정할 결과, 3,000 rpm의 조건에서 이상적인 동작특성을 가짐을 확인했다. 결론적으로, 다양한 측정 결과를 통해 스핀 코팅 공정 시 회전 속도는 3,000 rpm으로 진행하였을 때 폴리이미드 배향막의 표면 특성과 액정 배향 능력 및 전기광학특성이 우수함을 알 수 있었다.

ORCID

Hong-Gyu Park

<https://orcid.org/0000-0002-0663-830x>

감사의 글

이 논문은 2021~2022년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구 결과임.

REFERENCES

- [1] G. Chansin, *J. Inf. Disp.*, **37**, 49 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1002/msid.1201>]
- [2] T. M. Smeeton, E. Angioni, E. A. Boardman, M. Izumi, N. Iwata, Y. Nakanishi, and T. Ishida, *J. Soc. Inf. Disp.*, **50**, 742 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1002/sdtp.13027>]
- [3] M. O'Neill and S. M. Kelly, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33**, R67 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/10/201>]
- [4] S. Ishihara and M. Mizusaki, *J. Soc. Inf. Disp.*, **28**, 44 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1002/jsid.825>]
- [5] H. G. Park, E. M. Kim, G. S. Heo, H. C. Jeong, J. H. Lee, J. M. Han, T. W. Kim, and D. S. Seo, *Opt. Mater.*, **75**, 252 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.10.031>]
- [6] H. J. Ahn, J. J. Lee, J. S. Ahn, K. C. Park, J. G. Noh, D. Y. Yoo, and S. H. Paek, *Polym. Sci. Korea*, **35**, 385 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.7317/pk.2011.35.5.385>]
- [7] J. A. Kreuz and J. R. Edman, *Adv. Mater.*, **10**, 1229 (1999). [DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(199810\)10:15<1229::AID-ADMA1229>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(199810)10:15<1229::AID-ADMA1229>3.0.CO;2-B)]
- [8] G. M. Sessler, B. Hahn, and D. Y. Yoon, *J. Appl. Phys.*, **60**, 318 (1986). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.337646>]
- [9] F. Yakuphanoglu, Y. Caglar, S. Ilcan, and M. Caglar, *Phys. B*, **394**, 86 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2007.02.014>]
- [10] D. C. Kim, W. S. Han, B. H. Kong, H. K. Cho, and C. H. Hong, *Phys. B*, **401**, 386 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2007.08.194>]
- [11] S. Ilcan, Y. Caglar, M. Caglar, and B. Demirci, *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, **10**, 2592 (2008).
- [12] M. D. Tyona, *Adv. Mater. Res.*, **2**, 195 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.12989/amr.2013.2.4.195>]
- [13] D. B. Hall, P. Underhill, and J. M. Torkelson, *Polym. Eng. Sci.*, **38**, 2039 (1998). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.10373>]
- [14] Y. Chang, W. C. Wu, and W. C. Chen, *J. Electrochem. Soc.*, **148**, F77 (2001). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1357183>]
- [15] J. Norris, R. F. Giese, C. J. van Oss, and P. M. Costanzo, *Clays Clay Miner.*, **40**, 327 (1992). [DOI: <https://doi.org/10.1346/CCMN.1992.0400313>]
- [16] C. J. van Oss, M. K. Chaudhury, and R. J. Good, *Chem. Rev.*, **88**, 927 (1988). [DOI: <https://doi.org/10.1021/cr00088a006>]
- [17] L. T. Greagh and A. R. Kmetz, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **24**, 59 (1973). [DOI: <https://doi.org/10.1080/15421407308083389>]
- [18] H. K. Cho, *J. Archit. Inst. Korean Plan. Des.*, **31**, 83 (2015). [DOI: https://doi.org/10.5659/JAIK_PD.201]

- [19] M. Mizusakia, T. Miyashita, T. Uchida, Y. Yamada, Y. Ishii, and S. Mizushima, *J. Appl. Phys.*, **102**, 014904 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2752147>]
- [20] K. Y. Lo, C. C. Shiah, and C. Y. Huang, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45**, 891 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.45.891>]
- [21] Y. Garbovskiy, *Proceedings*, **62**, 10 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.3390/proceedings2020062010>]